

不同降水方案对“03. 7”一次暴雨过程模拟的影响

张 曼^{1, 2} 王昂生¹ 季仲贞¹ 张文龙^{1, 2}

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 观测和数值模拟研究已经表明, 潜热释放对中国东部夏季梅雨锋系统及其锋面降水的维持和发展发挥着非常重要的作用。然而, 目前对于梅雨锋降水模拟中各种降水方案的相互协调和系统评估方面的工作仍不多见, 为了增进对梅雨锋暴雨模拟中降水过程的认识, 作者针对 2003 年 7 月 4~5 日一次梅雨锋暴雨过程, 构造了四组试验, 利用 MM5 模式考察了两种分辨率(36 km、12 km), 各种隐/显式方案搭配下, 对所生成的雨带、雨量 and 降水类型的配置进行了仔细的研究, 得到了一些有意义的结论, 为今后更好地使用模式、利用数值模式来认识中尺度降水过程中的气象问题打下基础。主要结论包括: 模拟总降水的水平分布和强度, 以及显式降水和隐式降水的划分对积云参数化方案的选择非常敏感。但对特定积云参数化方案而言, 降水的模拟对 36 km、12 km 水平分辨率不敏感(除 Betts-Miller 方案外); 在中尺度网格分辨率 10~50 km 范围内, 不同积云参数化方案对梅雨锋降水分布和降水量模拟的影响比不同显式方案带来的变化大得多。

关键词 梅雨锋暴雨 MM5 模式 降水方案 数值模拟

文章编号 1006-9895(2006)03-0441-12

中图分类号 P445

文献标识码 A

Influence of Different Precipitation Parameterization Schemes on a Simulated “03. 7” Heavy Rainfall Case

ZHANG Man^{1, 2}, WANG Ang-Sheng¹, JI Zhong-Zhen¹, and ZHANG Wen-Long^{1, 2}

1 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract Observational and numerical modeling studies have consistently shown that the latent heat release plays an important role in maintenance and development of Meiyu front and frontal precipitation. However, a systematic evaluation of precipitation parameterization schemes (including subgrid-scale convective parameterization schemes and resolvable-scale cloud microphysics schemes) in the simulation of a Meiyu front has been rare in the literature. In order to enhance our understanding of the precipitation process, 4 sets of numerical experiments is constructed to evaluate the performance of implicit/explicit schemes which simulates the Meiyu frontal heavy rainfall on 4-5 July 2003 at grid resolution of 36 km and 12 km with MM5 model. Based on careful research on precipitation region and rainfall, some significative results have been got, which are good for further understanding and predicting mesoscale weather system using mesoscale numerical model. Principal findings are summarized as: The horizontal extent and intensity of precipitation, the partition of explicit precipitation and implicit precipitation are very sensitive to the choice of cumulus parameterization, but it is nearly the same on both the 36-km and 12-km grids for a given cumulus parameterization (except the Betts-Miller scheme); variations in the cumulus parameterization schemes have a much larger impact on the distribution and amount of Meiyu frontal precipitation than that in the explicit scheme at me-

scale grid resolutions of 10 km – 50 km.

Key words Meiyu front heavy rainfall, MM5 model, precipitation schemes, numerical modeling

1 引言

随着计算能力、数值计算方法的进步和对大气过程认识的不断深入,中尺度数值模式水平在过去几十年里已经得到了相当大的提高。以高分辨率(包括时间和空间)和显式(近)云尺度为特征的中尺度数值模拟已经逐渐显露出向科研和业务预报方向发展的趋势。然而,目前的计算机水平还不能支持在广泛的气象研究中用云分辨模式(cloud-resolving models, 简称 CRMs)直接对天气事件进行模拟。即使计算条件允许,考虑到当前云尺度运动模拟的可预报性和不易获得高分辨率实况资料作为云模式初始场等方面的因素,现在采用云分辨模式进行天气预报并不一定能改进预报效果。于是,虽然云微物理方案有明确的物理基础,但在目前中尺度模式格距尚未达到可分辨各种可引起云—降水过程尺度运动的情况下,近年来多数中尺度数值模式(例如 MM5、WRF、ARPS 等)都采用对流参数化方法和云微物理方案相结合的方法(通常也被称为混合方案)来进行数值模拟,即用积云参数化方案表述次网格尺度降水过程,用云微物理方案描写可分辨尺度降水过程。

积云参数化方案(也称隐式方案)的特点是在一定的闭合假设下,通过一些假设定义对流触发函数,当模式大气满足这些条件后,激发对流运动。人们已经提出了各种方法来用模式网格尺度变量表征次网格尺度上云的总体效应(Arakawa, 1993)。云微物理方案(也称显式方案)将网格尺度降水用显式法计算,即大气中水汽和水凝物的产生、平流以及相互作用等用格点上的预报方程直接计算。在最新 MM5V3 版本中有 7 种隐式方案和 6 种显式方案可供选择(详见 MM5 模式技术报告^[1])。Zhang 等^[2]与 Molinari 和 Dudek(以下简称 MD92)^[3]的研究都表明,当中尺度数值模式网格距大于 10 km 时,采用对流参数化和显式云微物理方案相耦合的方法(即混合方案),模式最有可能成功复制出中尺度对流系统(MCSs)的结构及其发展演变过程。

从当前的研究进展来看,即便在相对成熟的全球气候模式中,与降水过程有关的积云参数化仍然

是一个颇受争议的问题。不难理解,对于水平网格距在 10~50 km 之间的中尺度模式,其降水过程处理中的问题更为复杂。在这种分辨率下有一部分中尺度系统(例如对流环流、伴随层状云系中的雨带流型等)已经可以被模式所分辨;虽然真实的大气运动具有连续的运动谱,但是人们将数值模式中的可分辨尺度和次网格尺度运动分开来处理,可能造成了描述大气运动谱的断裂,因而应当考虑这种断裂的影响程度。

积云活动和大尺度大气运动之间的相互作用是一种复杂、高度非线性的过程,其中即包括了大尺度环流对对流活动的宏观控制,又包括了对流对大尺度运动的反馈作用。必须指出,虽然在过去几十年中,我们在这方面已经积累了不少经验和认识,但是总的来说,还没有构建出积云参数化的一般性理论;积云参数化与显式云方案的相互作用仍然属于一门发展中的学科,在如何正确地描述降水物理过程方面,还存在许多不确定性。这种不确定性主要表现在:由于激发和维持对流发生、演变和天气机制不同,再加上各方案体现着不同设计者对过程的认识,在描述它们时各有侧重,导致了不同的参数化方案可以影响强降水发生的方式。但是,这些方案虽然在用不同的中尺度模式对不同尺度和不同天气过程预报中都得到过不同程度的成功,却没有哪种方案在任何暴雨预报中有绝对优势。所以,在 MD92 关于中尺度对流降水的评述文章中已经指出,我们在广泛使用各种积云参数化方案来进行高分辨率数值模拟之前,有必要对它们进行更加深入细致的比较分析,力求明确各类方案的局限性及其之间的协调性。

在已经认识到中尺度模式的模拟结果对降水物理过程的处理方式具有高度敏感性的基础上,国内外学者针对不同研究对象做了一定的分析工作。Kuo 等^[4]利用中尺度数值模式 MM5,研究了各种积云参数化方案和可分辨尺度云微物理方案对一次爆发性海洋气旋模拟的影响。Wang 等^[5]也用 MM5 模式针对美国大陆冷/暖季的六次降水事件对不同积云参数化方案进行了比较研究。后来, Yang 等^[6]又在以上工作的基础上针对夏初影响我

国南方的一次华南前汛期降水过程进行了研究。王建捷等^[7]采用数值试验的方式考察了 MM5 中四种降水参数化方案及三种模式水平分辨率(60 km、20 km、10 km)对 1996 年 8 月初石家庄暴雨过程模拟的影响。模拟结果表明,随着分辨率的提高,雨带分布特征的模拟更接近实况;当分辨率提高到 10 km 时,虚假的降水中心也明显增加;四种方案下模拟的水平环流基本特征有较好的一致性,但模拟的云物理特征和垂直运动特征还是存在一定的差别。

梅雨是影响我国夏季降水的主要天气系统之一。每年 6 月中旬到 7 月下旬梅雨锋沿长江中下游经东海、日本可到达西太平洋,绵亘数千公里,为准静止的大尺度系统。陶诗言等^[8]根据 1953~1977 年的中国大暴雨资料研究历史上发生的中国大暴雨时就已指出:暴雨虽然是中尺度现象,却是几种不同尺度天气系统相互作用的结果。已有的对我国夏季江淮梅雨的研究表明,中国的多数暴雨实例中的降水量都集中在若干个几小时到十几小时的时段内,即都伴有中尺度活动,其中又以 β 中尺度系统对暴雨的增幅作用最为常见。梅雨锋降水系统中如此强烈的中小尺度系统活动必然伴随着积云对流活动的剧烈变化,因此,理解和描述好数值模式中成云致雨直接有关的降水物理过程对梅雨锋降水的成功模拟来说非常关键^[9, 10]。但国内在这方面的工作,特别是各降水方案对我国夏季汛期(6 月中旬~7 月中旬)江淮梅雨锋降水的模拟效果对比检验还仍是空白。本研究的主要目的就是利用 MM5 模式,通过对 2003 年 7 月 4~5 日一次江淮梅雨锋强降水过程的模拟,比较采用不同的积云参数化方案和云微物理方案搭配对雨带分布、总降水量和降水的中小尺度结构特征的不同模拟效果,研究在不同分辨率下,隐/显式方案的协调性问题,并试图给出合理的解释。所得结论对今后我国夏季梅雨锋降水预报研究有一定的参考价值。

最后,我们认为本研究的目的不在于评价各种降水方案的优势和不足,给出最优,而是着重探讨如下三个问题:(1)在其他条件完全相同的情况下,各种积云参数化方案和云微物理方案对降水的模拟是否有差异?如果有,差异有多大?(2)尝试用各降水方案自身具有的特点,对模拟的降水给出合理的解释。(3)研究模式水平分辨率对降水模拟

的影响。

2 试验方案设计

2.1 个例选择

2003 年 6 月 20 日至 7 月 21 日,我国淮河流域降水异常偏多,发生了自 1954 年以来全流域最大致洪暴雨,累积面平均降水达 487 mm,为常年同期的 2.2 倍。其中 7 月 3~5 日淮河流域自上游到下游的梯形降水是形成 2003 年淮河流域大洪水的主要降水过程。

利用美国 GOES 气象卫星每小时一次的红外云图分析本次暴雨期间对流云团的活动情况后,发现除了 4 日 06 时(国际协调时 UTC,下同)左右主要雨带经历了一次南跳过程外,从 4 日 06 时开始,在湖北省东部及其与江西省交界处不断有强对流系统生成,然后东移发展。经过南京附近的对流云团在 4 日 18 时~5 日 00 时是一次比较强的过程(图略),这与降水实况(图 1)是十分一致的。针对这次暴雨过程,气象工作者已经做了大量详细的天气气候诊断^[11]和数值模拟工作^[12],为我们从机理上理解这次暴雨事件的发生、发展提供了依据。

2.2 试验模式及方案

本文将采用 PSU/NCAR 联合开发的有限区域非静力中尺度数值模式 MM5V3.6 作为研究工具。模拟采用双向互动、两重嵌套网格,中心经纬度为(36°N, 103°E),水平格距分别为 36 km、12 km,格点数分别为 D1(100×150)、D2(112×139)。垂直方向分为 30 个 σ 层。侧边界条件为时变边界条

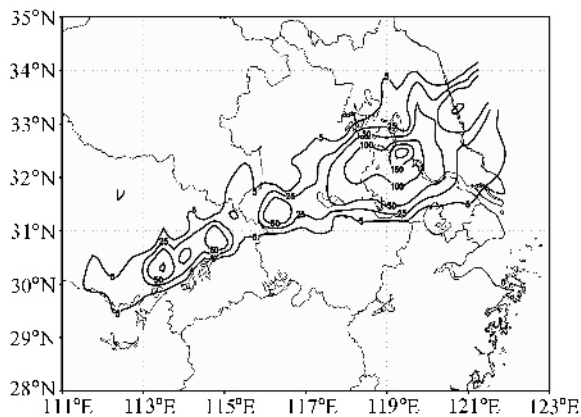


图 1 2003 年 7 月 4 日 18 时~5 日 00 时 6 小时实况降水(单位: mm)

Fig. 1 The observed accumulated rainfall between 1800 UTC 4 Jul 2003 and 0000 UTC 5 Jul 2003 (units: mm)

表 1 数值试验方案

Table 1 Schemes of numerical tests

	试验名称 Name	积云参数化方案 Cumulus pa- rameterization	云微物理方案 Microphysics pa- rameterization
组 A,B	KF_12A (36B)	KF2	Reisner 2
Set A,B	AK_12A(36B)	Kuo	Reisner 2
	GR_12A(36B)	Grell	Reisner 2
	BM_12A(36B)	Betts-Miller	Reisner 2
组 C, D	WR_12C (36D)	KF2	Warm rain
Set C,D	SI_12C (36D)	KF2	Simple ice
	MP_12C(36D)	KF2	Mix phase
	GD_12C(36D)	KF2	Goddard
	R2_12C(36D)	KF2	Reisner 2
	SZ_12C(36D)	KF2	Schultz

件,外部区域与 NCEP 的 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 格点资料采用单向嵌套,内部区域采用双向嵌套的方案。为了能包括更多的实况信息,用常规的探空、地面测站资料在背景场的基础上作再分析,形成初始场和最外层的侧边界条件。模式积分时段为 2003 年 7 月 4 日 00 时至 5 日 06 时。试验方案共分四组(见表 1),其中敏感性试验中的积云参数化方案包括 Betts-Miller 方案(BM)、Grell 方案(GR)、KF2 方案(KF)和 Anthes-Kuo 方案(AK);云微物理方案包括 Warm Rain 方案(WR)、Simple Ice 方案(SI)、Mixed Phase 方案(MP)、Goddard 方案(GD)、Reisner2 方案(R2)和 Schultz 方案(SZ)(用两个字母表示各方案,并作为各试验名的前缀;后缀用试验组名和网格距表示,如 12A 为 A 组试验,分辨率为 12 km)。

需要强调的是,由于其他物理方案中的近似假设带来的不确定性及模式初始场误差(特别是水汽场的偏差)等因素都有可能引起降水预报误差,我们不能将模拟降水误差全部归咎于降水方案产生。于是,为了简化这种复杂性,本文除了选用同一个中尺度数值模式(MM5)作为工具和相同的初始场进行模拟外,还选择了完全相同的其他物理方案(除隐/显式降水方案外),它们包括:高分辨率 Blackadar 边界层方案、云辐射方案、浅对流方案。另外,为了适应不同的模拟个例之间的差异,每种物理方案中都可能包含一些可调的物理参数,但这种做法在目前常规数值天气预报业务运行中是不现实的,因此而带来的不确定性在本研究中也是不允许的。

3 试验结果与比较分析

3.1 24 小时降水量的 TS 评分

TS 评分方法是目前气象台站检验数值预报产品对暴雨预报性能的评估方法之一。已知常用的 TS 评分方法可有多种表达形式,本文采用站点对站点的方法,即对同一个站点的降水预报值和观测值进行比较。站点的降水预报值由模式的格点降水预报值插值得到,表达式可写为

$$S_t = \frac{N_x}{N_x + N_y + N_z}, \quad (1)$$

其中, S_t 表示 TS 评分, N_x 表示预报了某一级别降水也观测到了这一级别降水的站数,即正确预报; N_y 为预报了某一级别降水但实况降水没有达到该级别的站数,即空报; N_z 为预报降水没有达到某一级别,但观测降水实际上达到该级别的站数,即漏报。

值得一提的是,人们已经意识到 TS 评分作为气象业务部门评估降水预报的传统做法,经常会反映不出视觉上可观察到的差异和优劣。所以,这里作者借用常规台站暴雨预报检验的 TS 评分方法,是为了说明各组合对降水预报总体性能的影响。但是,要对降水模拟能力进行进一步评价还需考虑用更细致、更科学的方法。

对表 1 中各试验模拟得到的 2003 年 7 月 4 日 00 时~5 日 00 时 24 小时累积降水量与由各台站每天 4 次地面常规观测资料得到的 24 小时观测降水进行了 TS 评分计算(表 2~5)以检验各试验对“03.7”淮河暴雨的模拟能力。四组试验的 TS 评分可以得到如下两条结论:(1)在同一分辨率(如组 A 和 C,组 B 和 D)下,没有哪种方案组合在本次淮河暴雨 24 h 降水预报中占有绝对优势;(2)对同一方案组合(如组 A 和 B,组 C 和 D),对同一评分域值而言,分辨率越高,模拟降水的 TS 评分亦越高。后一结论相对容易理解,模式采用的可分辨尺度越小,能模拟出的大气运动尺度谱越宽,换句话说,

表 2 试验组 A 的 24 小时 TS 评分值

Table 2 24-h period threat scores for various precipitation thresholds for set A

阈值 Threshold	KF_12A	AK_12A	GR_12A	BM_12A
5 mm	0.404	0.449	0.438	0.383
10 mm	0.452	0.371	0.361	0.375
30 mm	0.316	0.278	0.533	0.368

表 3 同表 2, 但为试验组 B

Table 3 Same as in Table 2 but for set B

阈值 Threshold	KF_36B	AK_36B	GR_36B	BM_36B
5 mm	0.374	0.414	0.366	0.328
10 mm	0.321	0.342	0.310	0.233
30 mm	0.069	0.111	0.108	0.163

表 4 同表 2, 但为试验组 C

Table 4 Same as in Table 2 but for set C

阈值 Threshold	WR_12C	SI_12C	MP_12C	GD_12C	R2_12C	SZ_12C
5 mm	0.375	0.413	0.404	0.435	0.404	0.391
10 mm	0.382	0.394	0.424	0.394	0.452	0.375
30 mm	0.353	0.400	0.278	0.333	0.316	0.389

表 5 同表 2, 但为试验组 D

Table 5 Same as in Table 5 but for set D

阈值 Threshold	WR_36D	SI_36D	MP_36D	GD_36D	R2_36D	SZ_36D
5 mm	0.381	0.359	0.395	0.387	0.374	0.371
10 mm	0.303	0.300	0.303	0.303	0.321	0.303
30 mm	0.067	0.069	0.067	0.103	0.069	0.100

模式网格距取得越小, 模式能够分辨出更详细的中(小)尺度动力、热力学特征, 再现的降水天气条件更加真实, 从而模拟降水也与实况更加接近。

对于结论(1)需要指出的是, 通过对各方案 24 h 累积降水分布的分析, 发现其雨带形状和内部结构的差异还是非常显著的(限于篇幅, 本文不给出图例), 这证实了上文所说的 TS 评分经常会掩盖视觉上的差异。另一方面, 由于这里计算的 24 h 降水评分, 导致无法表现出各方案组合是否能真实地再现短时间(如 6 小时)内降水中尺度特征。为了解决这一问题, 下文将结合各试验模拟的 6 h 降水特征的差异来详细讨论各方案的不同及其可能的原因。

3.2 各种积云参数化方案对“03.7”暴雨降水模拟的影响

3.2.1 6 小时总累积模拟降水量的比较

在保证其他模式设计完全相同的情况下, 得到试验组 A 中各试验的 4 日 18 时~5 日 00 时 6 小时累积总降水量 ($\Delta x=12$ km, 图 2)。这里的累积总降水代表隐式降水(即参数化降水)和显式降水之

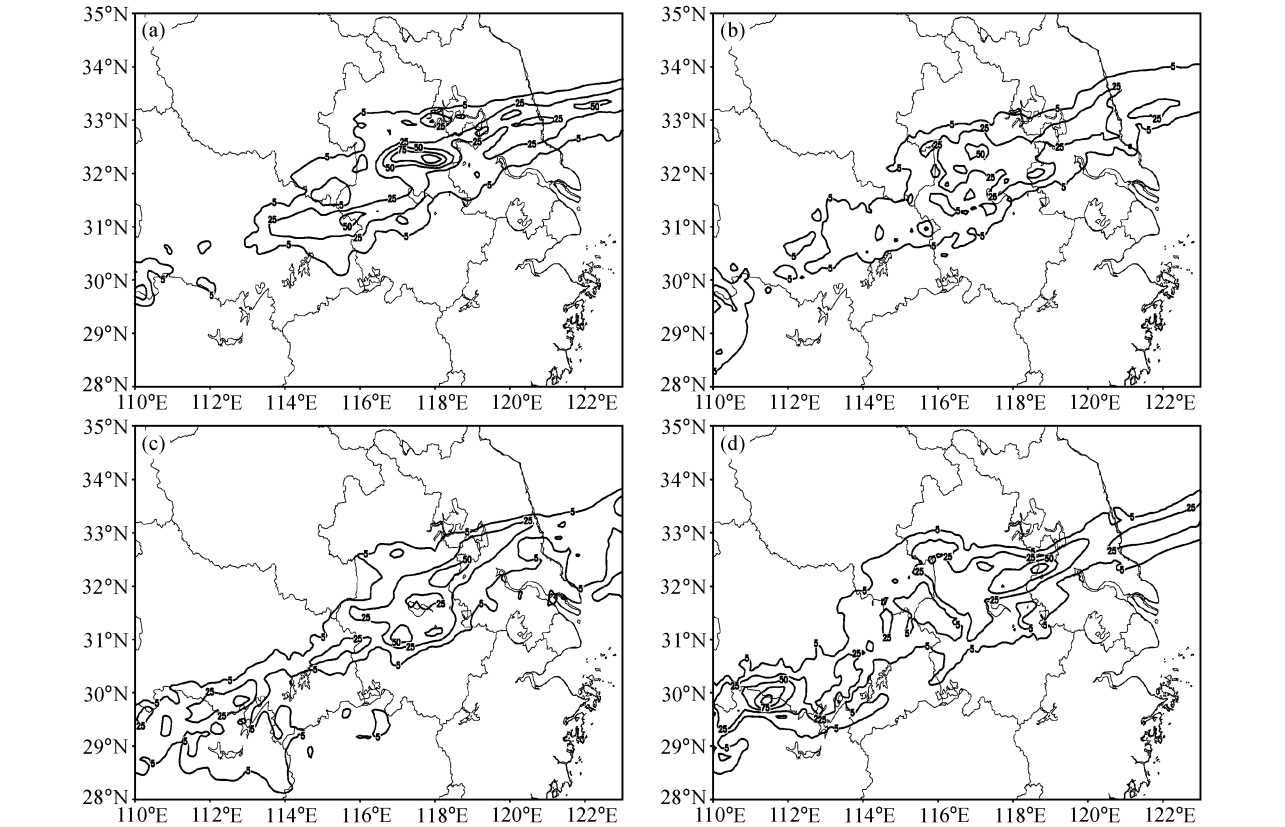


图 2 试验组 A 中各试验模拟的 4 日 18 时~5 日 00 时总降水量 (实线, 单位: mm): (a) KF_12A; (b) AK_12A; (c) GR_12A; (d) BM_12A
Fig. 2 Simulated 6-h (from 1800 UTC 4 Jul 2003 to 0000 UTC 5 Jul 2003) accumulated rainfall for various cumulus parameterizations on the 12-km grid (solid line, units: mm): (a) KF_12A; (b) AK_12A; (c) GR_12A; (d) BM_12A

和。各试验均能模拟出实况中的雨带分布(图 1b),特别是 KF2 和 Grell 方案还成功复制了南京附近、安徽西部和湖北东部三处强降水的局地特征。Betts-Miller 方案虽然也能模拟出这种特征,但雨带上游(湖北和湖南两省交界处)的虚假降水明显偏强。值得一提的是,在 12 km 的分辨率下, KF2 方案模拟的南京附近降水中心的六小时降水大于 100 mm,与实况十分接近。

3.2.2 隐式参数化降水和显式云降水的比较

过去在用数值模式进行降水预报时,人们通常只关注模拟的总降水量和分布与实况是否相符。而事实上,在既包括对流参数化方案又包括可分辨尺度显式方案的数值模拟中,将参数化降水和显式降水分开来研究,对理解模拟结果的合理性和防止绝对不稳定的产生等方面具有非常重要的作用^[13]。张大林^[13]认为在模拟 MCSs 时存在隐式和显式物

理过程的“能量竞争”机制。与显式方案相比,次网格尺度积云参数化描述了一个更快速的热量、水汽向上输送的过程,使垂直方向气层更迅速地变为稳定。如果处理不好两者之间的相互作用,由此引起的 CISK-like 现象容易造成模式积分的“崩溃”。

图 3 中显示了试验组 A 各试验模拟的 4 日 18 时~5 日 00 时 6 小时累积隐式降水和显式降水分布 $\Delta x=12$ km,由图可见,AK 试验模拟的总降水以参数化降水为主,可分辨尺度降水仅有零星分布;与之相反的是 Grell 方案,整个雨带中的降水以显式降水为主;而在 KF2 和 Betts-Miller 方案下,南京附近的最大降水中心以显式降水为主,其他地方以参数化降水为主。值得注意的是,上面四个试验虽然选用了不同的对流参数化降水方案,但是却采用的是同一种显式降水方案(Reisner 2),所

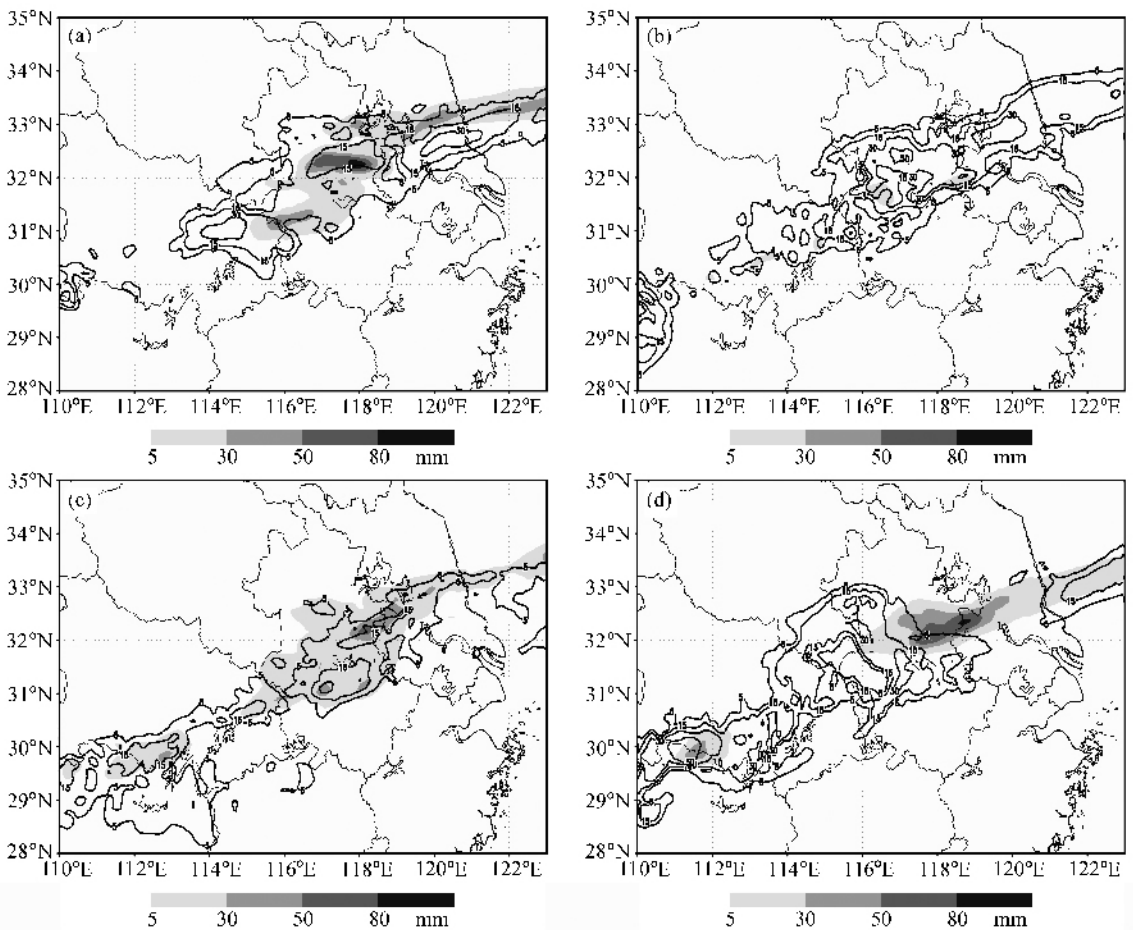


图 3 同图 2, 但为累积参数化降水(实线)和累积显式降水(阴影)

Fig. 3 Same as in Fig. 2, but for the parameterized 6-h accumulated rainfall (solid lines) and the 6-h accumulated explicit rainfall (shaded areas)

以,上述结果也说明次网格尺度参数化中的热量和水汽输送能对网格尺度中温度和水汽分布产生非常重要的影响。

试验组 A 中各试验 4 日 00 时~5 日 06 时降水模拟的统计特征见图 4。其中区域平均代表的是(30°N~33°N, 114°E~122°E)范围内的面积平均,该区域几乎覆盖了这个时间段内主要过程降水。

从每小时参数化降水与总降水比值的时间变化(图 4a)来看,也反映出 Kuo 方案下整个过程以参数化降水为主,参数化降水从模拟一开始就一直维持着较大的值,并且压制了显式降水的发展,只产生了很少量的显式降水(小于 0.1 个单位,图 4d)。

出现这一结果有一定的必然性^[14, 15],Kuo 方案的提出是基于大尺度的观测事实,即该方案是考虑质量、水汽辐合型假设的参数化方案,参数化降水的产生与大尺度水汽辐合成正比,比例系数为(1-*b*),其中*b*是一个与环境场相对湿度有关的函数。当降水系统开始发展时,环境场趋近于饱和,这时*b*的取值很小,于是辐合的水汽大部分被转化为隐式降水,留给可分辨显式降水的水汽量变小。由此看来,大尺度水汽辐合不足以描述中尺度降水,气柱往往可能变干,造成 Kuo 方案的模拟降水一般偏小(图 2b)。

与 Kuo 方案相反,Betts-Miller 方案下参数化降水偏小(图 4a)。Betts-Miller 方案^[16]采用的是依

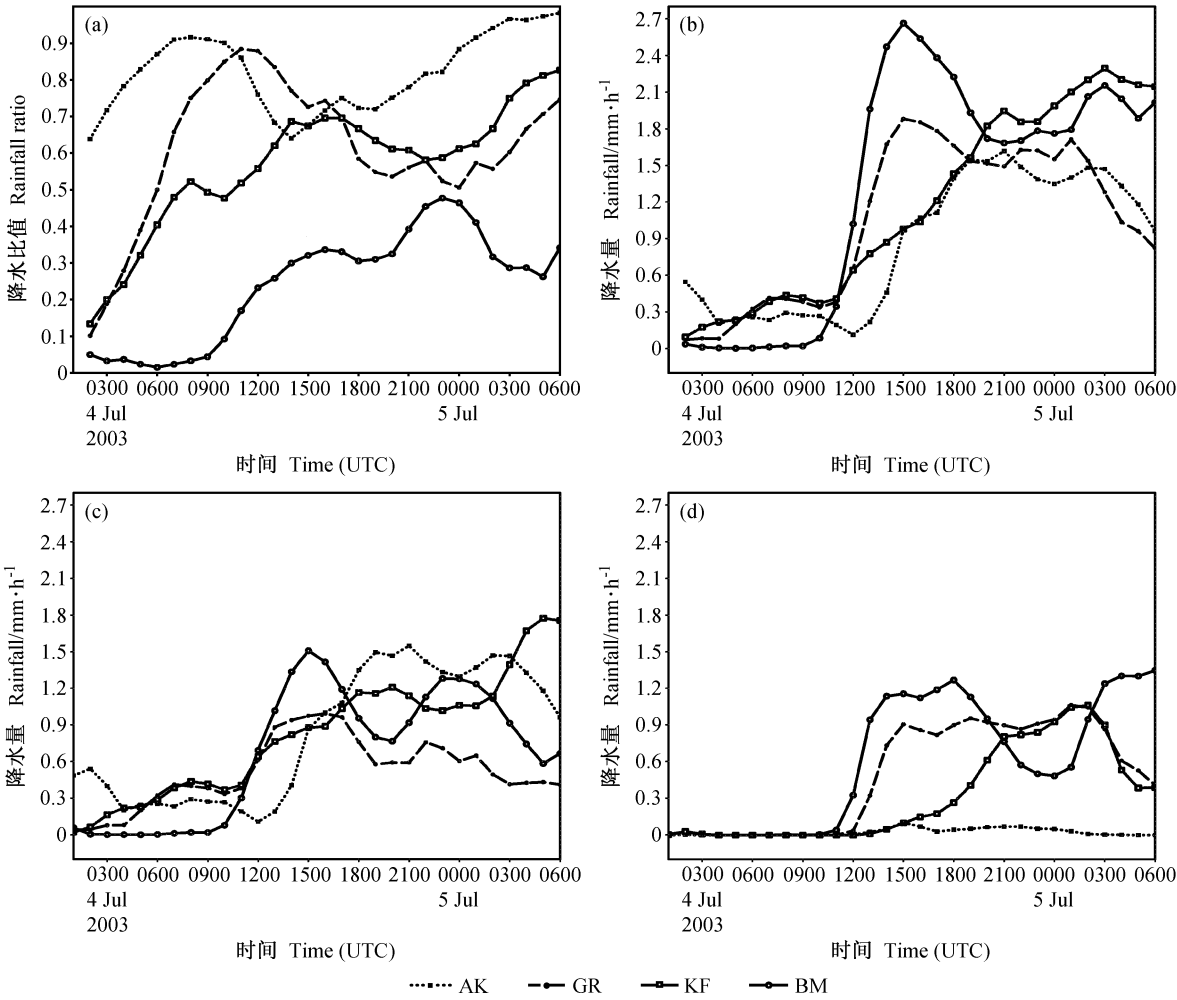


图 4 试验组 A 各试验降水模拟的统计特征:(a) 区域平均的每小时参数化降水占总降水比例的时间序列;(b) 区域平均的每小时总降水的时间序列;(c) 区域平均的每小时参数化降水的时间序列;(d) 区域平均的每小时显式降水的时间序列

Fig. 4 Statistical features of precipitation simulation for set A on the 12-km grid for the cumulus experiments: (a) Time series of domain-averaged hourly parameterized rainfall rates; (b) time series of domain-averaged hourly total rainfall; (c) time series of domain-averaged hourly parameterized rainfall; (d) time series of domain-averaged hourly explicit rainfall

据瞬时平衡假设的湿对流调整技术,认为积云对流的存在使模式热力学特征由非平衡态向准平衡热力学参考廓线调整。

总的来说, Kuo 和 Betts-Miller 方案中不直接描述下沉气流,因而不适于局地补偿性强对流,所以这两个方案一般适用于水平分辨率大于 30 km 的网格。图 4c 还表明 BM 试验中,参数化降水的出现是在模式运行了 9 小时后突然增加的,说明 Betts-Miller 方案可能在一定程度上会延迟对流的启动。

从各积云参数化方案设计的初衷来说, KF2 方案^[17, 18]和 Grell 方案^[19]对中尺度系统中的上升气流和下沉气流进行了描述,所以更适合于分辨率为 10~20 km 的数值模拟。从参数化降水占总降水的份额来看(图 4a),若忽略模式启动后前 6 小时 spin-up 阶段不稳定因素的影响,相比而言, KF2 方案下,降水比例搭配的性質比较稳定,而 GR、BM 和 AK 试验在系统加强和减弱的阶段显式/隐式降水之间的比例配置出现急剧增加或减小的变化,这是否说明它们与显式方案(这里用的是 Reisner 2 方案)的协调性不够稳定。

再分别从参数化降水和显式降水的模拟结果单独对 Grell 方案和 KF2 方案进行进一步比较(图 4c、d),发现 4 日 17 时之前两者雨量增长变化相当一致,而之后 KF2 试验中次网格尺度降水继续保持稳定上升,而 Grell 试验中已经开始减弱。Grell 方案和 KF2 方案作用下显式降水变化的主要差别在于: Grell 方案中 4 日 15 时~5 日 02 时显式降水保持相对稳定的较大值(约等于 0.9 个单位),而 KF2 方案中在该时间段中表现出显式降水逐渐增强,直到最大的过程。由于两试验采用的是同一种显式降水方案, Grell 方案在模拟的总降水量并不占优势的基础上,模拟的参数化降水偏少,显式降水偏多。我们从中似乎可以得到这样的结论: Grell 方案能将更多的不稳定能量传递给显式降水方案,从而产生更多的显式降水。从 Grell 方案设计的原理中同样也可以说明:为了避免小尺度不稳定的发生, Grell^[19]在方案中加入了一个自动开关项。由于方案中的对流性下沉气流参数化和降水率参数化本身还存在不足,引起 Grell 方案过于频繁地被关闭,进而使次网格尺度显式方案被反复强迫启动。所以用 Grell 方案进行中尺度数值模拟经常会发现

显式降水偏多的现象^[4]。

3.2.3 水平分辨率对各种积云参数化方案的影响

当采用的分辨率越小时,模式能模拟出更细致的降水中小尺度特征(图略),这一结论与王建捷等的研究结果^[7]是一致的。从图 5a 可以看出,降水模拟对模式水平分辨率具有一定的敏感性。随着网格距的增加,各方案基本保持降水比例的总体形势,但变化振幅略有增长。当 $\Delta x=36$ km 时, KF2 方案和 Grell 方案的模拟结果更加接近。

将不同分辨率模拟结果比较后发现,最明显的不同是在粗分辨率的情况下, BM 试验的参数化降水明显加强,从而导致模拟的总降水量增强(图 5d)。BM 试验对水平分辨率的敏感性可以用 Betts-Miller 方案中松弛时间尺度 τ 的取值来解释^[16]。原则上,为了保证一定量次饱和的存在,若网格距减小, τ 应该也随之减小。但是在本试验中,我们在两种分辨率下取的是同一个 τ 值,从而可能会产生一定的偏差。

3.3 各种云微物理显式方案对“03.7”暴雨降水模拟的影响

Liu 等^[20]对台风 Andrew 的高分辨率显式模拟研究表明,显式云方案中描述水凝物类型和各种冰相物理过程对模拟的雨区分布、降雨量大小及中小尺度系统的结构特征具有十分重要的影响。下面讨论显式云方案对降水模拟的影响,在这两组试验(组 C、组 D)中均采用 KF2 作为积云参数化方案。

图 6 是试验组 C 的 4 日 18 时~5 日 00 时的累积降水模拟结果,虽然采用的是同一种隐式方案,但与之配合的显式方案不同,模拟的参数化降水也各不相同。但是,混合方案下 MM5 降水模拟对不同显式方案的敏感性相比于不同隐式方案的敏感性要小得多(比较图 4 和图 7 的各分图),可见积云参数化方案和显式云方案之间存在着复杂的相互作用,两者之间的相互协调问题对降水模拟具有十分重要的影响。

从总降水的变化来看: 4 日 18 时系统加强后,暖雨试验模拟的总降水较其他方案略为偏低。暖雨方案中只包括了水蒸气、云水和雨水的预报方程,还对未饱和层的蒸发过程进行了描述。暖雨试验生成的降水偏少说明了在显式方案中增加冰相物理过程对降水量的生成具有正的贡献,至少在降水系统强盛时是这样。简单冰相方案和混合相态方案对降

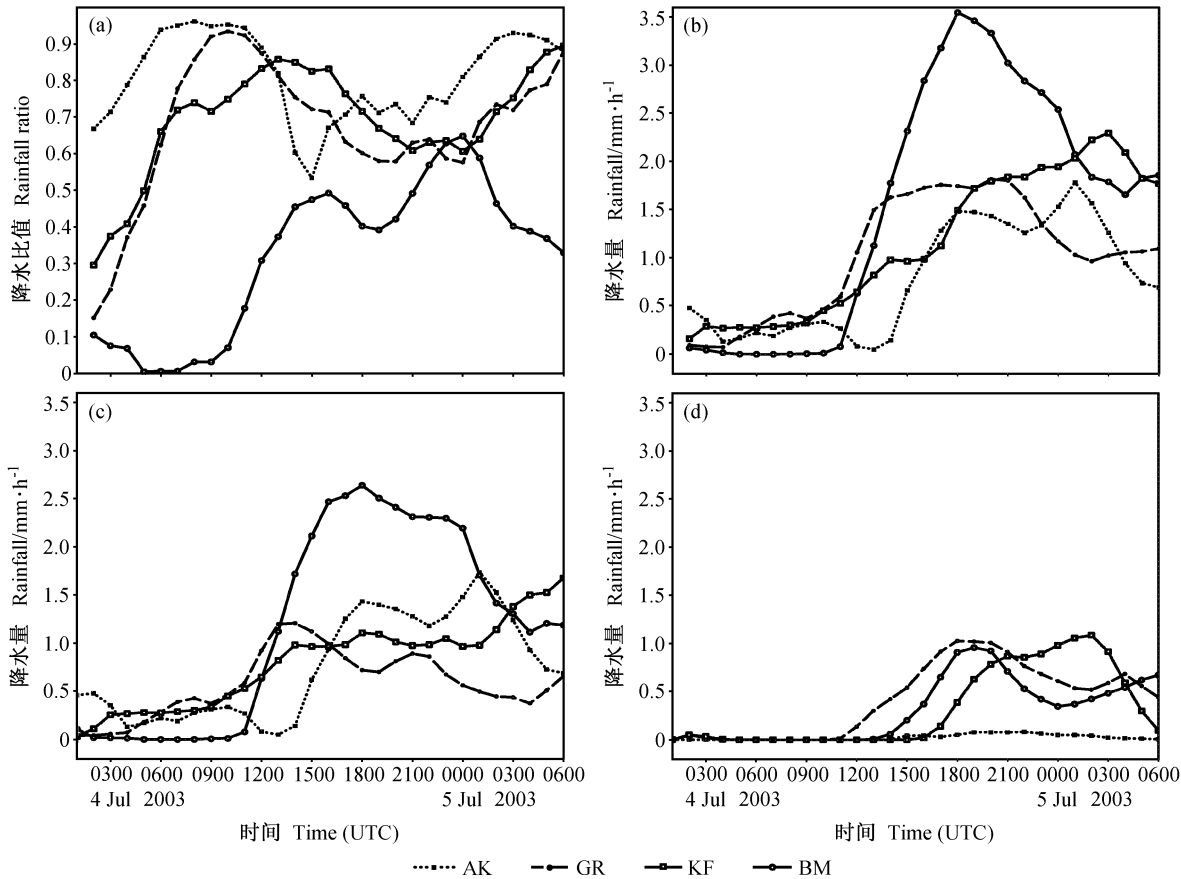


图 5 同图 4，但为试验组 B

Fig. 5 Same as in Fig. 4, but for set B

水统计特征的模拟结果非常相近，这是因为两方案的物理过程基本相同，只是在混合方案中增加考虑了过冷却液态水的存在。这同时说明了过冷却液态水对地面降水的影响不大。

虽然 Schultz 微物理方案是一种高效和简化的物理方案，对业务应用有一定的优势^[1]，但该方案在和同一积云参数化方案(这里指的是 Reisner2)作用下产生的显式降水较其他方案偏少(图 7a)，这是一个在今后应用 Schultz 方案进行中尺度数值模拟时应该注意的问题。

在目前发布的最新 MM5 版本中，Goddard 和 Reisner 2 是物理过程相对详尽，预报量也较多的两种云微物理显式方案，两者在云分辨模拟方面具有一定的优势，张大林^[13]的研究也表明详尽的物理过程如水负荷、升华、蒸发和融化对抑制 CISK-like 现象的发展十分有效。但从本例来看，虽然 Reisner 2 和 Goddard 方案的物理过程比其他方案

完善，但模拟的总降水量和降水类型的合理搭配方面并没有优势。楼小凤^[21]通过各方案对台风 Andrew 的研究也得到了类似的结论。可以说得到这样的结果具有一定的必然性。在目前的分辨率下相当部分的中小尺度信息都不能被网格变量所分辨，再加上积云参数化描述了一个更快的向上输送热量、水汽的过程，从而在很大程度上弱化了显式云方案的影响。我们可以进一步预见到随着模式网格距的减小，模拟中可显式分辨的云微物理过程增多，显式云方案所扮演的角色将越来越重要。事实上，人们已经指出当中尺度模式的网格距减小到一定程度时(如 $\Delta x \leq 6$ km)，可采用全显式模拟。

当网格距增加到 36 km 时，各显式方案下的模拟降水已表现不出如图 7 中所示的中小尺度特征。但区域平均每小时降水的时间序列也基本反映出了分辨率为 12 km 时的特征。限于篇幅，本文不再赘述。

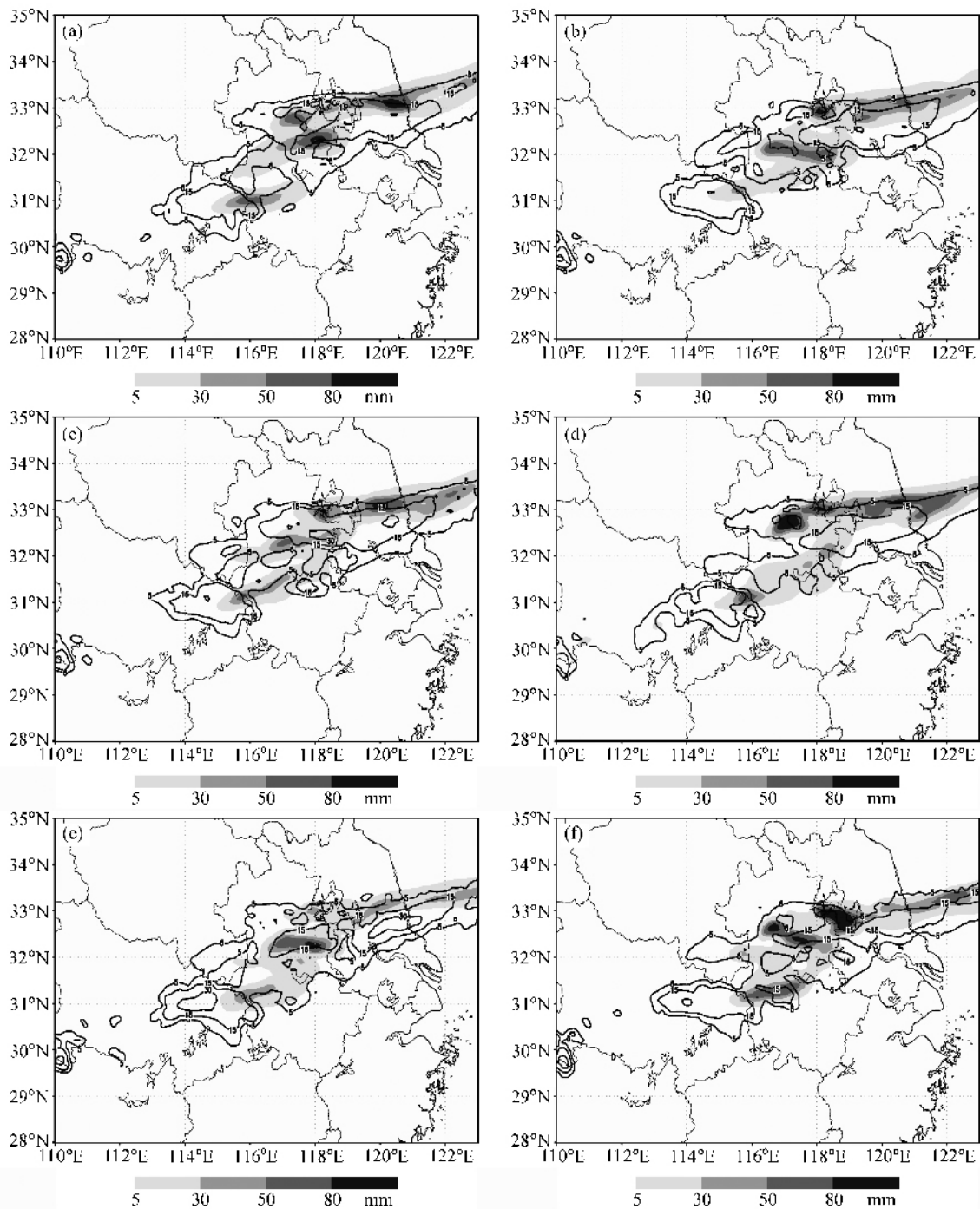


图 6 同图 3，但为试验组 C
Fig. 6 Same as in Fig. 3, but for set C

4 结论

本文将 MM5 模式中各种显式、隐式降水方案相互搭配，对 2003 年 7 月初淮河流域一次暴雨过程进行了对比试验，得到以下结论：

(1) 在同一分辨率下(如试验组 A 和 C、试验组

B 和 D)，没有哪种方案组合在本次淮河暴雨 24 小时降水预报评分中占有绝对优势；对同一方案组合(如试验组 A 和 B、试验组 C 和 D)，对同一评分域值而言，分辨率越高，模拟降水的 TS 评分亦越高。

(2) KF_12A 和 GR_12A 试验成功复制出了 7 月 4 日 18 时~5 日 00 时强降水的局地性特征，并

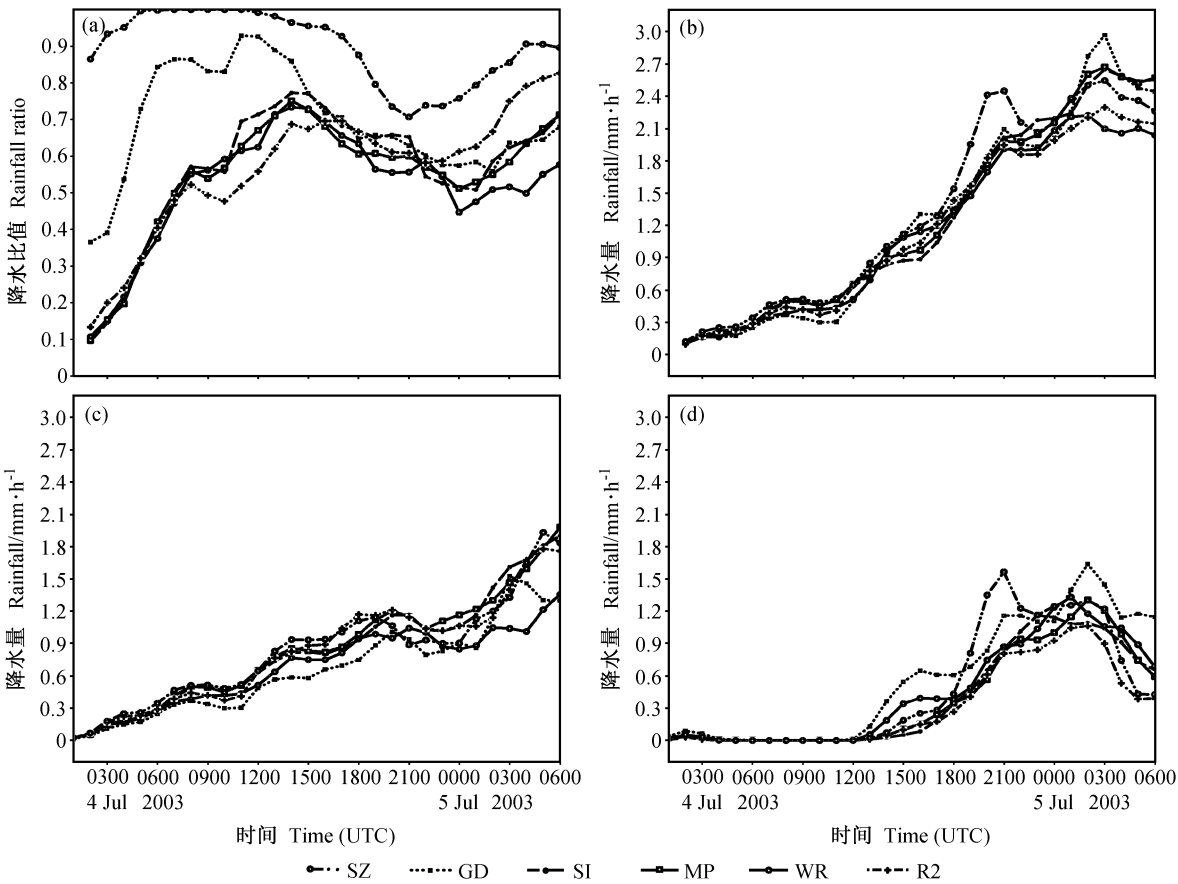


图 7 同图 4，但为试验组 C
Fig. 7 Same as in Fig. 4, but for set C

且 KF_12A 模拟的南京附近降水中的 6 小时降水大于 100 mm，与实况十分接近。

(3) 12 km 网格距下，若忽略 spin-up 阶段的振荡过程，KF2 方案产生的降水比例(参数化降水与总降水之比)随时间变化相对稳定，而 GR、BM、AK 试验得到的比例配置出现了急剧增加或减小的变化，这是否意味着它们与显式方案(这里是指 Reisner2 方案)的协调性不够稳定，值得深入研究。

(4) 12 km 网格距下，与 KF2 方案相比，Grell 方案能将更多的不稳定能量传递给显式降水方案，从而产生更多的显式降水。

(5) BM 试验随模拟分辨率的减小，参数化降水明显加强，从而导致总降水的增强。BM 试验对水平分辨率的敏感性可以用 Betts-Miller 方案中松弛时间尺度 τ 的取值来解释。所以在用 Betts-Miller 方案进行中尺度数值模拟时，应注意 τ 的取值(原则上为了保证一定量次饱和的存在，若网格距减小， τ 应该也减小)。

(6) 在 10~50 km 网格距下，显式方案不同比隐式方案不同对 MM5 降水模拟带来的敏感性要小得多。但显式方案中所描述的水凝物类型和各种冰相物理过程对中小尺度数值模拟所起的作用仍不可忽视，并将随分辨率的提高而增大。

当然，本文仅仅通过一次梅雨锋暴雨个例，采用 MM5 模式分析研究了各种降水方案及水平分辨率对降水模拟的影响，结论只是初步的。降水过程首先通过相变潜热、水凝物负荷和水汽密度对大气热力、动力和辐射过程有重要的直接反馈作用，降水在这里仅是中尺度数值天气预报的预报对象。研究降水过程之间及其与模式之间的相互适应问题还需要从以上各方面深入展开。同时注意到，降水模拟对不同显式方案的敏感性相对参数化方案要小。因此，随着计算条件的提高允许更小的格距，在中尺度模式中仅采用显式方案应该能够减少降水预报的不确定性。大力发展显式方案可能是提高中尺度模拟水平的一条有效途径。

参考文献 (References)

- [1] Dudhia J, Gill D, Manning K, et al. PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and User's Guide; MM5 Modeling System Version 3. Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, January 2000
- [2] Zhang D-L, Fritsch J M. Numerical sensitivity experiments of varying model physics on the structure, evolution and dynamics of two mesoscale convective systems. *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**: 261~293
- [3] Molinari J, Dudek M. Parameterization of convective precipitation in mesoscale numerical models: A critical review. *Mon. Wea. Rev.*, 1992, **120**: 326~344
- [4] Kuo Y-H, Reed R J, Liu Y-B. The ERICA IOP 5 storm. Part III: Mesoscale cyclogenesis and precipitation parameterization. *Mon. Wea. Rev.*, 1996, **124**: 1409~1434
- [5] Wang W, Seaman N L. A comparison study of convective parameterization schemes in a mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.* 1997, **125** (2): 252~278
- [6] Yang M-J, Chien F-C, Cheng M-D. Precipitation parameterization in a simulated Mei-yu front. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2000, **11** (2): 393~422
- [7] 王建捷, 胡欣, 郭肖容. MM5 模式中不同对流参数化方案的比较试验. 应用气象学报, 2001, **12** (1): 41~53
Wang Jianjie, Hu Xin, Guo Xiaorong. Comparison experiments on cumulus parameterization schemes of the MM5. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2001, **12** (1): 41~53
- [8] 陶诗言. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980. 225pp
Tao Shiyan. *The Storm Rainfall in China*. Beijing: Science Press, 1980. 225pp
- [9] 高守亭, 赵思雄, 周晓平, 等. 次天气尺度及中尺度暴雨系统研究进展. 大气科学, 2003, **27**(4): 618~627
Gao Shouting, Zhao Sixiong, Zhou Xiaoping, et al. Progress of research on sub-synoptic scale and mesoscale torrential rain systems. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27**(4): 618~627
- [10] 倪允琪, 周秀骥. 我国长江中下游梅雨锋暴雨研究的进展. 气象, 2005, **31**(1): 9~12
Ni Yunqi, Zhou Xiujie. Review on study of heavy rainfall within the Meiyu front in the middle and lower reaches of the Changjiang River. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2005, **31**(1): 9~12
- [11] 孙建华, 卫捷, 张小玲, 等. 2003 年夏季的异常天气及预测试验. 气候与环境研究, 2004, **9**(1): 203~217
Sun Jianhua, Wei Jie, Zhang Xiaoling, et al. The abnormal weather in the summer 2003 and its real-time prediction. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (1): 203~217
- [12] 马旭林, 刘还珠, 薛纪善, 等. 江淮梅雨锋强暴雨低涡系统发生发展的数值研究. 南京气象学院学报, 2004, **27**(3): 347~355
Ma Xulin, Liu Huanzhu, Xue Jishan, et al. Numerical study on the genesis and development of the low vortex-rain gush system on a Jianghuai Meiyu front. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2004, **27**(3): 347~355
- [13] 张大林. 各种非绝热物理过程在中尺度模式中的作用. 大气科学, 1998, **22**(4): 548~561
Zhang Dalin. Roles of various diabatic physical processes in mesoscale models. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1998, **22**(4): 548~561
- [14] Kuo H L. Further studies of the parameterization of the effect of cumulus convection on large scale flow. *J. Atmos. Sci.*, 1974, **31**: 1232~1240
- [15] Anthes R A. A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model. *Mon. Wea. Rev.*, 1977, **105**: 270~286
- [16] Betts A K. A new convective adjustment scheme. Part I: Observational and theoretical basis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1986, **112**: 677~691
- [17] Kain J S, Fritsch J M. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, 1990, **47**: 2784~2802
- [18] Kain J S. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *Journal of Applied Meteorology*, 2004, **43**: 170~181
- [19] Grell G A. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**: 764~787
- [20] Liu Yubao, Zhang Da-Lin, Yau M K. A multiscale numerical study of Hurricane Andrew (1992). Part I: Explicit simulation and verification. *Mon. Wea. Rev.*, 1997, **125**: 3073~3093
- [21] 楼小凤, 周秀骥, 胡志晋, 等. MM5 模式显式微物理方案的对比分析. 气象科技, 2004, **32** (1): 6~12
Lou Xiaofeng, Zhou Xiujie, Hu Zhijin et al. Comparison of explicit microphysical schemes in MM5. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 2004, **32** (1): 6~12